

УДК 536.62937

## ИННОВАЦИОННЫЙ ДАТЧИК ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Г.Н. Лукьянов<sup>a</sup>, И.С. Ковальский<sup>a</sup>, С.Л. Макаров<sup>a</sup>, Т. Зеегер<sup>b, c</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> Институт термодинамики, Университет Зиген, Зиген, 57076, Германия

<sup>c</sup> Высшая школа передовых оптических технологий (SAOT), Университет Эрланген-Нюрнберг, Эрланген, 91052, Германия

Адрес для переписки: Ilya.kovalskiy@hotmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 15.11.16, принята к печати 30.12.16

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-137-142

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Лукьянов Г.Н., Ковальский И.С., Макаров С.Л., Зеегер Т. Инновационный датчик теплового потока // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 1. С. 137–142. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-137-142

### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлен метод измерения теплового потока, использующий поляризационные свойства сегнетокерамики. На основе предложенного метода разработан инновационный датчик теплового потока. Выполнена его экспериментальная проверка. **Метод.** Измерения основаны на поддержании равновесия между процессами, вызванными тепловой энергией и энергией электрического поля в сегнетоэлектрике. **Основные результаты.** Тестирование предложенного датчика теплового потока проведено в два этапа. На первом этапе осуществлена первичная градуировка с помощью поверенных датчиков ИТП МГ4.03/х(у) «Поток». На втором этапе проведена апробация датчика теплового потока в качестве вычислителя количества теплоты. Выполнено сравнение результатов с показаниями серийных приборов учета тепла ВКТ-7 и СТК-15. Эксперименты показали, что поляризационные свойства сегнетокерамики могут быть использованы для измерения теплового потока. **Практическая значимость.** Предложенный датчик может быть рекомендован в качестве квартирного прибора учета тепла. Градуировка предложенного датчика теплового потока с помощью более точных средств измерения позволяет внести его в Государственный реестр средств измерения.

### Ключевые слова

датчик теплового потока, тепловой поток, сегнетоэлектрик, количество теплоты, поляризация сегнетоэлектриков

## INNOVATIVE HEAT FLUX SENSOR

G.N. Lukyanov<sup>a</sup>, I.S. Kowalskiy<sup>a</sup>, S.L. Makarov<sup>a</sup>, T. Seeger<sup>b, c</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> Institute of Engineering Thermodynamics, University of Siegen, Siegen, 57076, Germany

<sup>c</sup> Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT), University of Erlangen-Nuremberg, Erlangen, 91052, Germany

Corresponding author: Ilya.kovalskiy@hotmail.com

### Article info

Received 15.11.16, accepted 30.12.16

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-137-142

Article in Russian

**For citation:** Lukyanov G.N., Kowalskiy I.S., Makarov S.L., Seeger T. Innovative heat flux sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 137–142. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-137-142

### Abstract

**Subject of Study.** We present a method for heat flux measuring with the use of polarization properties of ferroelectric ceramics. Heat flux innovative sensor is developed on the basis of the proposed method. Its experimental verification is carried out. **Method.** The measurements are based on maintaining a balance between the processes caused by thermal energy and the energy of the electric field in the ferroelectric ceramics. **Main Results.** The testing of the proposed heat flux sensor has been organized in two stages. At the first stage the primary calibration has been performed by calibrated sensors ITP MG4.03/x(y) “Potok”. At the second stage the testing of heat flux sensor has been carried out for calculating the quantity of heat. The comparison of the results to the readings of serial heat meters VKT-7 and STK-15 has been performed. Experiments

have shown that the polarization properties of the ferroelectric ceramics can be used to measure the heat flow. **Practical Relevance.** The proposed sensor can be recommended as an apartment-level heat meter. The calibration of the proposed heat flux sensor with more accurate measurement tools gives the possibility to include it on the State Register of Measuring Instruments.

#### Keywords

heat flux sensor, heat flow, ferroelectric ceramics, heat quantity, ferroelectric material polarization

#### Введение

Известно, что для полного описания и понимания теплового состояния какого-либо объекта необходимо знать его температурное поле и тепловые потоки [1].

Существуют разные методы для измерения тепловых потоков [2]. Наибольшее распространение получил метод типа «вспомогательная стенка» [3]. Практическая реализация данного метода основана на том, что согласно закону Фурье удельный тепловой поток определяется выражением

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx},$$

где  $\lambda$  – теплопроводность;  $x$  – координата;  $t$  – температура.

Для случаев, когда теплопроводность  $\lambda = \text{const}$  и не зависит от координаты  $x$  и температуры  $t$ , можно записать

$$q = -\lambda \frac{\Delta t}{\Delta x}.$$

Тогда, если имеется пластинка (диск) толщиной  $\Delta x$  и известной величиной  $x$ , то из перепада температур на ней  $\Delta t$  можно определить удельный тепловой поток  $q$ . Для измерения перепада  $\Delta t$  либо размещают датчики температуры на поверхностях диска, либо пользуются многоспайной термопарой.

Однако, несмотря на свою простоту, этот метод не лишен недостатков. Для того чтобы с высокой точностью измерить  $\Delta t$ , необходимо выполнение одного из двух условий: либо теплопроводность датчика должна быть достаточно мала, либо толщина датчика  $\Delta x$  должна быть велика для получения высокого значения  $\Delta t$ .

При малой теплопроводности перепад температур  $\Delta t$  будет достаточно большим, но датчик при этом создаст дополнительное сопротивление проходящему через него потоку и тем самым исказит тепловое состояние объекта измерения. То же самое произойдет при увеличении толщины датчика  $\Delta x$ . Также следует отметить, что изготовление такого типа датчика довольно трудоемко.

В последние годы широкое применение для решения различных задач, в том числе при создании новых типов датчиков, получили материалы, обладающие сегнетоэлектрическими свойствами. На основе такого материала создан новый метод измерения теплового потока [4, 5] и инновационный датчик теплового потока (далее датчик). Новизна предлагаемого метода и датчика на его основе заключается в использовании сегнетоэлектриков в качестве чувствительного элемента. Преимуществом предлагаемого метода является низкая себестоимость и малая инерционность датчика.

#### Материалы и методы

В основу метода положено свойство сегнетоэлектрического материала менять степень поляризации в зависимости от количества поглощенного им тепла [6–8]. Это выражается в виде сильной зависимости диэлектрической проницаемости от температуры. Такая зависимость на сегодняшний день хорошо изучена. Например, для кристалла титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) первые публикации появились еще в сороковые годы двадцатого столетия [7]. Величина диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  для титаната бария меняется от нескольких десятков до нескольких тысяч (рис. 1, [7]).

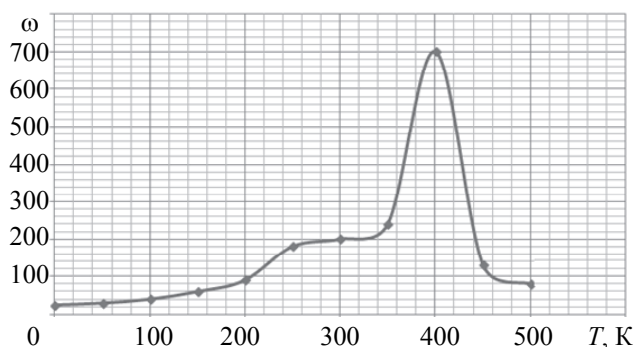


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  титаната бария от температуры [7]

Недостатком, ограничивающим применение указанного эффекта в сенсорике, является сильный гистерезис, появляющийся при поляризации [9, 10]. Исходя из этого, в основу функционирования предлагаемого прибора положен принцип поддержания динамического равновесия между спонтанной поляризацией датчика, вызываемой поглощенным датчиком теплом, и поляризацией электрическим полем, создаваемым электронной схемой. При этом заряд датчика осуществляется за счет поглощенной теплоты (спонтанная поляризация), а разряд происходит путем применения электрической схемы, учитывающей также знак заряда [11, 12]. Для подтверждения теоретической возможности метода предложена математическая модель работы датчика. В ней датчик представлен в виде плоской пластины из сегнетоэлектрика с напыленными на грани металлическими обкладками (рис. 2), образующими конденсатор, емкость которого зависит от количества поглощенного тепла и температуры.

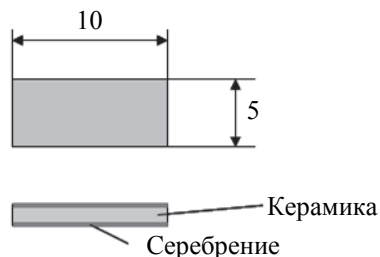


Рис. 2. Чувствительный элемент датчика

В основу модели положен принцип поддержания динамического равновесия между спонтанной поляризацией датчика, вызываемой поглощенным датчиком теплом, и поляризацией электрическим полем, создаваемым электронной схемой. При этом за направление электрического поля выбрано направление, противоположное спонтанной поляризации.

Уравнение теплопроводности для одномерного случая имеет вид

$$\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + P_v = \rho c_T \frac{\partial t}{\partial \tau},$$

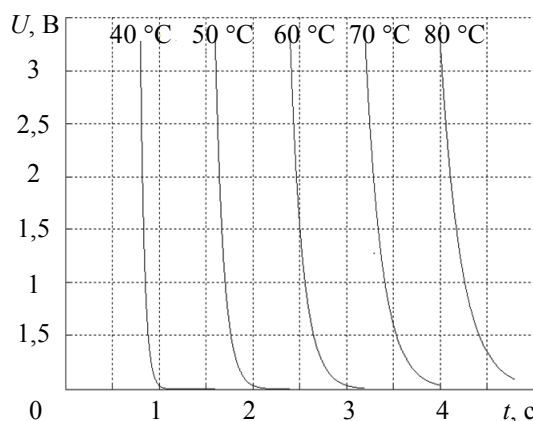
где  $P_v$  – мощность внутренних источников энергии;  $c_T$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность,  $\tau$  – время. Если

температурное поле равномерно, то  $P_v = \rho c_T \frac{\partial t}{\partial \tau}$ . Тогда полная мощность тепловыделений равна

$P = \rho c_T V \frac{\partial t}{\partial \tau}$ , где  $V$  – объем пластины. Последнее выражение можно переписать в виде

$$P = C_T \frac{\partial t}{\partial \tau},$$

где  $C_T = \rho c_T V$  – полная теплоемкость.

Рис. 3. Результат моделирования процесса заряда-разряда конденсатора на диэлектрике при площади конденсатора 100 мм<sup>2</sup>, толщине 0,1 мм, напряжении  $U=3,3$  В, изменении температуры от 40 °C до 80 °C

Энергия заряженного конденсатора равна  $E = \frac{C_e U^2}{2}$ , где  $C_e$  – емкость конденсатора;  $U$  – напряжение на обкладках конденсатора. Тогда можно записать:

$$C_T \frac{\partial t}{\partial \tau} = C_e \frac{U^2}{2} \frac{1}{\tau}.$$

На рис. 3 приведен результат моделирования процесса заряда–разряда конденсатора на диэлектрике из материала BaTiO<sub>3</sub>.

#### Апробация метода

Изготовлены и испытаны чувствительные элементы датчиков из керамики титаната бария с характеристическими размерами 10×5×1 мм (рис. 4).

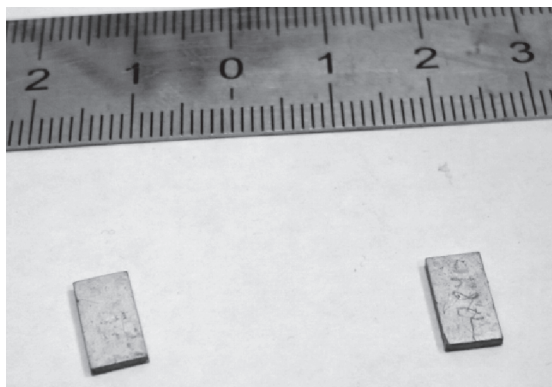


Рис. 4. Практическая реализация чувствительного элемента датчика теплового потока

При воздействии теплового потока, в зависимости от его направления, формируется положительный или отрицательный заряд. Нами применена электрическая схема с однополярным питанием. При ее использовании измерить отрицательный и положительный заряды напрямую невозможно. В результате этого предложена схема, которая позволяет избежать появления отрицательного заряда на чувствительном элементе, за счет его постоянной зарядки малым током. Таким образом, величина теплового потока преобразуется в изменение скорости заряда чувствительного элемента: при увеличении теплового потока скорость заряда возрастает, при уменьшении – падает.

При апробации датчик устанавливался на секцию радиатора отопления [13, 14]. На ту же секцию, в непосредственной близости от него, ставился стандартный датчик теплового потока с известной характеристикой типа ИТП МГ4.03/х(у) «Поток», предназначенный для измерения и регистрации плотности тепловых потоков, проходящих через однослойные и многослойные ограждающие конструкции зданий и сооружений.

На рис. 5 показан процесс заряда и разряда чувствительного элемента датчика при значениях теплового потока 100 Вт/м<sup>2</sup> (рис. 5, а) и 280 Вт/м<sup>2</sup> (рис. 5, б). Хорошо видно, что при увеличении теплового потока чувствительный элемент заряжается быстрее. Создан модуль, позволяющий проводить соответствующие измерения.

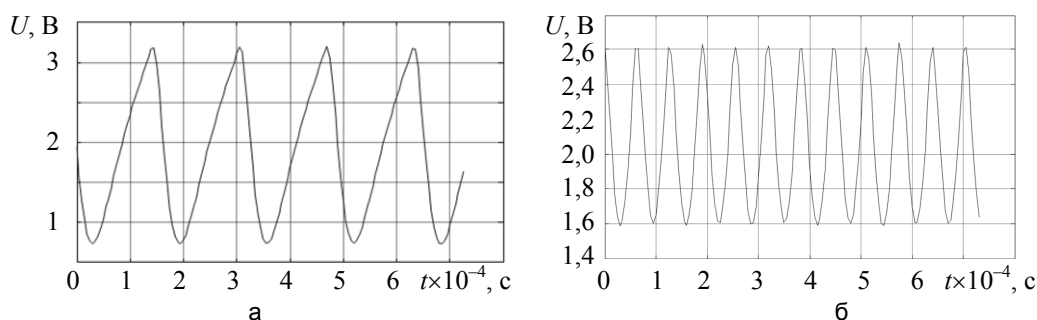


Рис. 5. Напряжение на чувствительном элементе при показаниях контрольного прибора «Поток»: 100 Вт/м<sup>2</sup> (а); 280 Вт/м<sup>2</sup> (б)

Рассмотренный метод избавлен от недостатков датчика типа «вспомогательная стенка», может быть изготовлен достаточно тонким (до 0,5 мм). Его чувствительность при уменьшении толщины пластины возрастет, а искажения первоначального теплового состояния объекта становятся ничтожно малы. В результате этого появляется возможность измерять быстро меняющиеся тепловые потоки. Существенным достоинством датчика является то, что он может производиться практически на любом предприятии электронной промышленности, любыми размерами партий. Технологический процесс производства датчиков достаточно прост и обеспечивает хорошую воспроизводимость свойств [15, 16].

Для оценки качества и точности показаний разработанного датчика теплового потока его показания сравнивались в эксперименте приборами учета количества теплоты ВКТ-7 и СТК-15 «МАРС».

Датчики прибора СТК-15 устанавливались на входе и выходе радиатора отопления, прибор ВКТ-7 вычислял полные потери тепловой энергии на радиаторе и в трубах (рис. 6). По показаниям датчика теплового потока произведен расчет количества теплоты, отданного радиатором. Сравнительные результаты представлены на рис. 7. Из графика видно, что показания датчика теплового потока практически не отличаются от прибора учета тепла СТК-15. Оба датчика вычисляли потери тепла только на радиаторе. Показания ВКТ-7 значительно выше, так как данный прибор вычислял потери во всем контуре. Пики на показаниях СТК-15 обусловлены его низкой чувствительностью и высокой погрешностью.

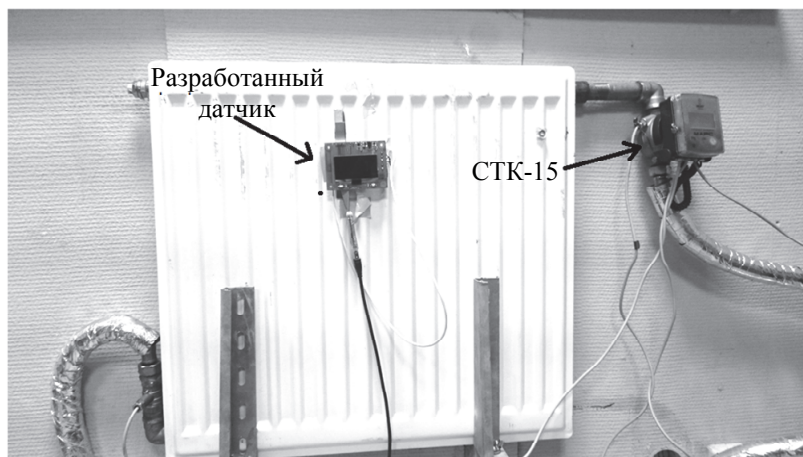


Рис. 6. Радиатор с установленными на нем датчиком СТК-15 и разработанным датчиком

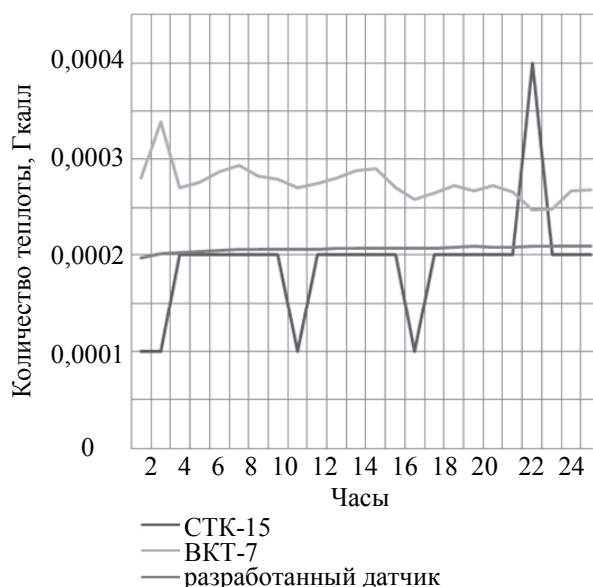


Рис. 7. Часовые показания поверенных датчиков учета тепла и разработанного датчика

### Заключение

В работе предложен новый принцип измерения теплового потока, основанный на поддержании динамического равновесия между спонтанной поляризацией датчика, вызываемой поглощенным датчиком теплом, и поляризацией электрическим полем, создаваемым электронной схемой. На этом принципе создан и испытан инновационный датчик.

Испытания датчика продемонстрировали, что поляризационные свойства сегнетокерамики могут быть применены для измерения теплового потока. Апробация опытных образцов показала удовлетворительные результаты при сравнении с работой поверенных датчиков. Характеристики датчиков имеют высокую повторяемость, поскольку керамические пластины из одной партии имеют практически одинаковые характеристики.

Градуировка предложенного датчика теплового потока с помощью более точных средств измерения в дальнейшем позволит внести его в Государственный реестр средств измерения.

## Литература

1. Геращенко О.А. Основы теплотметрии. Киев: Наукова думка, 1971. 191 с.
2. Геращенко О.А. Современное состояние теплотметрии в СССР // Инженерно-физический журнал. 1990. Т. 59. № 3. С. 516–522.
3. Григорович Б.М., Назаренко И.П., Никитин П.В., Сотник Е.В. Определение теплового потока к теплоёмкостному (таблеточному) датчику регулярного режима по дискретным значениям его температуры // Современные проблемы науки и образования. 2007. № 6. С. 36–40.
4. Лукьянов Г.Н., Мاستин М.С., Протопопов А.Л. Способ измерения теплового потока. Патент RU2488080. Оpubл. 20.07.2013.
5. Лукьянов Г.Н., Мастин М.С., Протопопов А.Л. Устройство для измерения теплового потока. Патент RU124795. Оpubл. 10.02.2013.
6. Ржанов А.В. Титанат бария - новый сегнетоэлектрик // УФН. 1949. Т. 38. С. 461–489. doi: 10.3367/UFNr.0038.194908a.0461
7. Мудрецова С.Н., Майорова А.Ф. Новые принципы измерения тепловых потоков // Вестник МГУ. Химия. 1999. Т. 40. №4. С. 219–222.
8. Барфут Дж. Введение в физику сегнетоэлектрических явлений. М.: Мир, 1970. 352 с.
9. Струков Б.А., Леванюк А.П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. М.: Наука, 1983.
10. Панич А.Е., Левина Т.Г. Физика сегнетоэлектрической керамики: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: РГУ, 2002. 45 с.
11. Каллаев С.Н., Гаджиев Г.Г., Камилов И.К., Омаров З.М., Садыков С.А., Резниченко Л.А. Теплофизические свойства сегнетокерамики на основе ЦТС // ФТТ. 2006. Т. 48. № 6. С. 1099–1100.
12. Струков Б.А. Сегнетоэлектричество в кристаллах и жидких кристаллах: природа явления. Фазовые переходы, нетрадиционные состояния вещества // Соросовский образовательный журнал. 1996. №4. С. 81–89.
13. Grosshandler W., Blackburn D. Development of a high flux conduction calibration apparatus // American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division, HTD. 1997. V. 353. P. 153–158.
14. Murthy A.V., Tsai B., Saunders R. Facility for calibrating heat flux sensors at NIST: an overview // Proc. ASME Heat Transfer Division. 1997. V. 3. P. 159–164.
15. Костенко К.С., Лукьянов Г.Н., Петров Д.С. Экспериментальное исследование динамики теплообмена через ограждающую конструкцию // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53. №4. С. 45–48.
16. Lukyanov G., Kovalski I., Malyshev A. Sensorics in energy saving and water treatment // IEEE WORKSHOP Industrial and Medical Measurement and Sensor Technology. 2016.

## References

1. Gerashhenko O.A. *Basics of Heat-Flow Measuring*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1971, 191 p. (In Russian)
2. Gerashhenko O.A. Current status of heat-flow measuring in USSR. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 1990, vol. 59, no. 3, pp. 516–522. (In Russian)
3. Grigorovich B.M., Nazarenko I.P., Nikitin P.V., Sotnik Ye.V. Heat flow determination to heat capacious (tablet) steady regime detector elements on its temperature discrete values. *Modern Problems of Science and Education*, 2007, no. 6, pp. 36–40. (In Russian)
4. Luk'janov G.N., Mastin M.S., Protopopov A.L. *Method to Measure Thermal Flow*. Patent RU2488080, 2013.
5. Luk'janov G.N., Mastin M.S., Protopopov A.L. *Apparatus for Measure Thermal Flow*. Patent RU124795, 2013.
6. Rzhanov A.V. Barium titanate - a new ferroelectric. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1949, vol. 38, pp. 461–489.
7. Mudretsova S.N., Maiorova A.F. New principles of heat flow measuring. *Vestnik MGU. Khimiya*, 1999, vol. 40, no. 4, pp. 219–222. (In Russian)
8. Barfut Dzh. *Vvedenie v Fiziku Segnetoelektricheskikh Yavleniy* [Introduction to the Physics of Ferroelectric Phenomena]. Moscow, Mir, 1970, 352 p.
9. Strukov B.A., Levanyuk A.P. *Ferroelectric Phenomena in Crystals: Physical Foundations*. Springer, Berlin, 1998, 308 p.
10. Panich A.E., Levina T.G. *Physics of Ferroelectric Ceramics: Textbook*. Rostov-on-Don, RSU Publ., 2002, 45 p. (In Russian)
11. Kallaev S.N., Gadzhiev G.G., Kamilov I.K., Omarov Z.M., Sadykov S.A., Reznichenko L.A. Thermal properties of PZT-based ferroelectric ceramics. *Physics of the Solid State*, 2006, vol. 48, no. 6, pp. 1169–1170. (In Russian) doi: 10.1134/S1063783406060473
12. Strukov B.A. Ferroelectricity in crystals and liquid crystals: the phenomenon nature. Phase transitions, non-traditional states of matter. *Sorosovskii Obrazovatel'nyi Zhurnal*, 1996, no. 4, pp. 81–89. (In Russian)
13. Grosshandler W., Blackburn D. Development of a high flux conduction calibration apparatus. *American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division, HTD*, 1997, vol. 353, pp. 153–158.
14. Murthy A.V., Tsai B., Saunders R. Facility for calibrating heat flux sensors at NIST: an overview. *Proc. ASME Heat Transfer Division*, 1997, vol. 3, pp. 159–164.
15. Kostenko K.S., Luk'yanov G.N., Petrov D.S. Experimental study of dynamics of heat exchange through enclosure. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, vol. 53, no. 4, pp. 45–48.
16. Lukyanov G., Kovalski I., Malyshev A. Sensorics in energy saving and water treatment. *IEEE WORKSHOP Industrial and Medical Measurement and Sensor Technology*, 2016.

## Авторы

**Лукьянов Геннадий Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, gen-lukjanow@yandex.ru

**Ковальский Илья Сергеевич** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Ilya.kovalskiy@hotmail.com

**Макаров Сергей Леонидович** – заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, halogenmsl@yandex.ru

**Зеегер Томас** – доктор технических наук, профессор, руководитель, Институт технологий термодинамики, Университет Зигена, Зиген, 57076, Германия; профессор, руководитель, Высшая школа передовых оптических технологий (SAOT), Университет Эрлангена-Нюрнберга, Эрланген, 91052, Германия, Thomas.Seeger@uni-siegen.de

## Authors

**Gennadij N. Lukyanov** – D.Sc., Professor, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, gen-lukjanow@yandex.ru

**Ilya S. Kovalskiy** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Ilya.kovalskiy@hotmail.com

**Sergei L. Makarov** – Head of laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, halogenmsl@yandex.ru

**Thomas Seeger** – D.Sc., Professor, Mentor, Institute of Engineering Thermodynamics, University of Siegen, Siegen, 57076, Germany; Professor, Mentor, Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT), University of Erlangen-Nuremberg, Erlangen, 91052, Germany, Thomas.Seeger@uni-siegen.de